

Opinnäytetyö (AMK)
Elektroniikka
Tietoliikennejärjestelmät
2014

Lauri Iljin

MITTALAITTEIDEN KALIBROINTI, KARTOITUS JA YLLÄPITO



TURUN AMMATTIKORKEAKOULU
TURKU UNIVERSITY OF APPLIED SCIENCES

OPINNÄYTETYÖ (AMK) | TIIVISTELMÄ

TURUN AMMATTIKORKEAKOULU

Elektroniikka | Tietoliikennejärjestelmät

2014 | 24

Ohjaaja: Yliopettaja Juha Nikkanen

Lauri Iljin

MITTALAITTEIDEN KALIBROINTI, KARTOITUS JA YLLÄPITO

Opinnäytetyön tarkoituksena oli kartoittaa Sandvik Mining and Construction Oy:n mittalaitteet ja suunnitella mittalaitteille kalibrointitiedot uuteen kalibrointi - ja kartoitusjärjestelmään. Työ sisälsi mittalaitteiden kartoituksen, kalibrointi- ja kartoitusjärjestelmän käyttöohjeet ja käyttöönottolomakkeen, jotka laadittiin Sandvik Mining and Construction Oy:n tietokantaan.

Tässä opinnäytetyössä selvitettiin tutkimusluonteisesti mittalaitteiden kalibrointiin ja kalibroinnin suorittamiseen liittyvät asiat. Työn pääpaino oli eri kalibrointiperusteiden läpikäynti ja fysikaaliset faktat perusteiden takana. Opinnäytetyössä perehdytään hydraulisten, mekaanisten ja sähköisten mittalaitteiden kalibrointiin ja kalibrointiperusteisiin. Työssä ei perehdytä mittalaitteisiin tai mittalaiteluokkiin, joita ei toimeksiantajan tehtaassa ole.

Tämän opinnäytetyön saavutettava tulos oli mittalaitteiden kartoitus, manuaalit ja tulevaisuuden toimenpiteet. Toimeksiantajalle kirjoitettiin myös omat päätelmät parantaakseen yrityksen kykyä arvioida kustannus- ja työttehokkuutta mittalaitteiden käsittelyn kanssa.

ASIASANAT:

kalibrointi, kartoitus, mittalaite, ohjeistus

BACHELOR'S THESIS | ABSTRACT

TURKU UNIVERSITY OF APPLIED SCIENCES

Electronics | Telecommunication systems

2014 | 24

Instructor: Juha Nikkanen, Lic.Sc (Tech), Principal lecturer

Lauri Iljin

MEASURING DEVICE CALIBRATION, MAPPING AND MAINTENANCE

The purpose of this bachelor's thesis was to survey the measuring devices of Sandvik Mining and Construction Oy and update new calibration information to the new calibration and mapping system. This work contains the mapping of measuring devices, the measuring devices calibration and mapping systems manual and the user manual for new measuring devices. The mapping, calibration and system manuals were added to the Sandvik Mining and Construction Oy database for later use by workers.

The purpose of this thesis is to research measuring devices calibration. This was achieved by examining different calibration information and physical facts behind the information. This work focuses on hydraulic, mechanical and electrical measuring devices calibration and calibration process. This work does not focus on measuring devices which the client does not own or use.

The result of this thesis was the mapping of measuring devices, the manuals and recommendations for future actions. This thesis was made to improve the clients ability to wage cost efficiency and effectivity on measuring devices calibrations.

KEYWORDS:

Calibration, mapping, measuring device, guidelines

SISÄLTÖ

KÄYTETYT LYHENTEET

1 JOHDANTO	1
2 MITTALAITTEIDEN KALIBROINTI	2
2.1 Mittalaitteen kalibrintiperusteet	2
2.2 Hydraulisen mittalaitteen kalibrointi	3
2.3 Mekaanisen mittalaitteen kalibrointi	6
2.3.1 Vetovoiman ja vääntömomentin kalibrointi	6
2.3.2 Kappaleen mittojen sekä kierteiden mittaus	7
2.4 Sähköisen mittalaitteen kalibrointi	8
2.4.1 Infrapunalämpömittarin kalibrointi	8
2.4.2 Tasajännitteen, vaihtojännitteen, virran ja vaihtovirran kalibrointi	10
2.4.3 Resistanssin kalibrointi	13
2.4.4 Kapasitanssin ja induktanssin kalibrointi	15
2.4.5 RF-kalibrointi	18
3 MITTALAITTEIDEN KARTOITUS, OHJEISTUS JA YLLÄPITO	20
3.1 Mittalaitteiden kartoitus	20
3.2 Mittalaitteiden kalibrintijärjestelmän ohjeistus	20
3.3 Mittalaitteiden käyttönottolomake	21
4 YHTEENVETO	22
LÄHTEET	24

LIITTEET

- Liite 1. Mittalaitteiden kartoitus
- Liite 2. Mittalaitteiden kalibrintijärjestelmän ohjeistus
- Liite 3. Mittalaitteiden käyttönottolomake

KUVAT

Kuva 1. Mittausten normaali vaihteluväli	2
Kuva 2. Paineen mittaaminen on paine-erojen mittaamista	5
Kuva 3. Kappaleen mittojen mittaus	7
Kuva 4. Mittalaitteen kalibroinnin myöntövyyskuvio	12
Kuva 5. Wheatstonen silta	14
Kuva 6. Kalibroinnin suhteellinen epävarmuus suhteessa kalibroitavaan resistanssiin	15
Kuva 7. Kvadratuurisilta	16
Kuva 8. Impedanssisilta	17
Kuva 9. AH2500A-mittasilta ja kalibroitava 1 nF:n kapasitanssinormaaliiin	17
Kuva 10. Manuaalisen ja automaattisen kalibroinnin tarkkuuserot	18
Kuva 11. Vektorianalysointilaitteen toimintaperiaate	19

KUVIOT

Kuvio 1. Pyrometrin näkemät lämpötilat eri aukon halkaisijalla	10
--	----

KÄYTETYT LYHENTEET

AC	Vaihtovirta
DC	Tasavirta
GPIB	Lyhyille etäisyyksille tarkoitettu mittalaitteväylä (General Purpose interface bus)
LCR-mittari	Induktanssi, kapasitanssi, resistanssimittari
RF	Radiotaajuus
SI-järjestelmä	Kansainvälinen mittayksikköjärjestelmä
SSE	Lähteen koon vaikutus kohteeseen (Size of Source Effect)

1 JOHDANTO

Teknologiasektörissä käytettävien mittalaitteiden kalibrointi on alan yrityksille erittäin tärkeä elementti laadun takaamiseksi. Kalibroinnilla tarkoitetaan instrumentin mittaustuloksen yhteyttä kansainvälisesti sovittuun vertailumittaan. Mittalaitteiston mittanormit elävät vuosien mittaan käytössä, ja tämän takia mittalaitteet on kalibroitava tietyin aikavälein, jotta varmistetaan mittalaitteiston jatkuva toimiminen vuosien varrella.

Tässä opinnäytetyössä perehdytään kalibrointiin ja erilaisten mittalaitteiden kalibroinnin suoritukseen. Tässä työssä pysytään toimeksiantajan omistamissa mittalaiteluokissa, jotka olivat hydrauliset, mekaaniset ja sähköiset mittalaitteet. Jokaisen mittalaitteityypin osioissa perehdytään mittalaitteen fysikaalisiin perusteisiin ja kalibroinnin suorituksessa mittalaitteen kalibroinnin suoritustekniikoihin. Ensimmäisenä käydään läpi hydraulisten mittalaitteiden kalibroinnin perusteet, jonka jälkeen mekaanisten mittalaitteiden perusteet ja viimeisenä tarkastellaan sähköisten mittalaitteiden kalibrointia. Kolmen kyseisen jaoston perusteiden läpikäynnin jälkeen käydään läpi toimeksiantajan perusteet ja mistä kyseisessä toimeksiantossa oli kyse. Työn sisältö perustui pääsääntöisesti seminaari-materiaaleihin kalibroinnista ja Mittauskeskuksen (MIKES) antamaan informaatioon kalibroinneista ja niiden suorituksista.

Tämä opinnäytetyö tehtiin toimeksiantajana Sandvik Mining and Construction Oy:lle. Opinnäytetyön alussa kartoitettiin yrityksen mittalaitteet ja tutustuttiin yrityksen kartoitus- ja kalibrointijärjestelmään, jota yritys tulee käyttämään mittalaitteiston tietokantana ja kalibroinnissa. Mittalaitteiston kartoituksen jälkeen mittalaitteiston kalibrointivälit suunniteltiin yrityksen toimintamallin mukaisesti. Mittalaitteiden kartoitus on nähtävillä liitteessä 1. Tietokanta ja kalibrointityölle kirjoitettiin ohjeistus, joka kattaa tietokannan käytön, mittalaitteiston vaihtuvuuden ohjeistuksen sekä mittalaitteiden kalibroinnin vaativat toiminnot. Ohjeistus ja vaihtuvuuden lomake ovat nähtävillä liitteissä 2 ja 3.

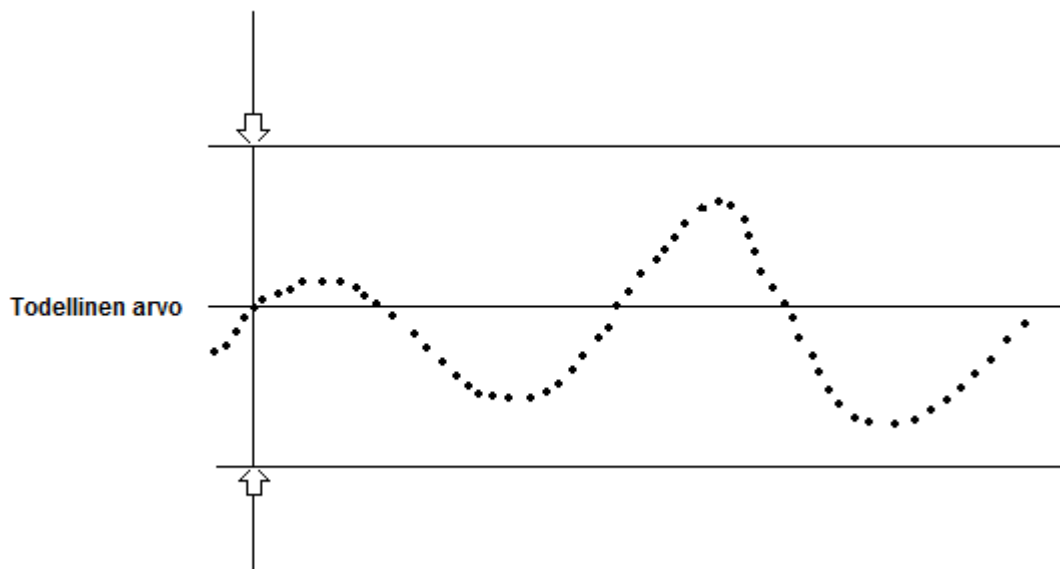
2 MITTALAITTEIDEN KALIBROINTI

Tässä luvussa käydään läpi kalibroitiperusteita mittalaitteille, joita toimeksiantavalla yrityksellä oli käytössä. Työssä ei perehdytä mittalaiteluokkiin, joita toimeksiantaja ei käytä tai omista.

2.1 Mittalaitteen kalibroitiperusteet

Kalibroinnilla tarkoitetaan sitä, että mittalaitteen antamaa lukemaa verrataan jäljiteltävästi kalibroituun mittanormaaliin. Kyseinen mittanormaali on kalibroitu akkreditoidussa kalibrointilaboratoriossa. Mittalaitteen kalibroinnissa laite viritetään näyttämään oikeaa, mittanormaalina antamaa lukemaa. [1]

Mittalaitteiden tulos ei ole koskaan täysin oikea vaan jokaisessa laitteessa ilmenee aina jonkin verran poikkeamaa. Kuva 1. kuvastaa mittalaitteen normaalia vaihteluväliä. Pidemmällä aikavälillä mittausten virheiden keskiarvo on nolla, jos laite toimii oikein. [2]



Kuva 1. Mittausten normaali vaihteluväli [3]

Ikääntyneen tai rasittuneen mittalaitteen suorituskyky laskee, ja tätä suorituskyvyn laskua tai poikkeamaa kutsutaan ryöminnäksi. Ryöminnän seurauksena

mittalaitteen antamat tulokset ovat epävarmoja ja luotettavuus laskee. Tällaisen rasittuneen mittalaitteen käyttö vaarantaa niin tuotannon laadun kuin pahimmassa tilanteessa käyttäjän turvallisuuden. Mittalaitteen ryömintää tapahtuu aina eikä sitä voi poistaa, mutta se voidaan havaita mittalaitteen kalibroinnilla. Mittalaitteen kalibroinnilla varmistetaan, että laite toimii sille määrätyissä mittatarkkuusrajoissa. Tämän takia mittalaitteet tulee kalibroida annetuissa aikaväleissä, jotta varmistetaan paras laatu ja käyttöturvallisuus. [1][2]

Jos mittauksissa ei edellytetä erityistä tarkkuutta, voidaan käyttää kalibroinnin sijasta vakausta. Vakaus tarkoittaa mittalaitteen tarkastamista, ja sen tekee Suomessa Turvallisuus – ja kemikaalivirasto (Tukes). Vakaus vaatii mittalaitteen olevan tyyppihyväksytty vakaukelpoiseksi. Pääsääntöisesti vakaattavia mittalaitteita ovat ne, joita käytetään taloudellisen edun määrittämiseen yleisissä kaupoissa, liikenteessä, yleisillä myyntipaikoilla ja julkisessa toiminnassa. [1]

2.2 Hydraulisen mittalaitteen kalibrointi

Hydrauliikalla tarkoitetaan tehonsiirtoa nesteen, paineen ja nesteen virtauksen avulla. Hydraulisisissa mittalaitteissa tärkeimmät kalibroitavat elementit ovat paineen mittausta ja hydraulisen kuormituksen mittausta. Hydraulisen mittalaitteen kalibroinnissa käytettävät mittanormaalit ovat painevaakoja, joilla paine realisoitetaan määritelmällä [1]:

$$p = F/A,$$

jossa p on paine, F on voima ja A on pinta-ala.

Hydrostaattisen paineen määritelmä on:

$$p = \rho gh,$$

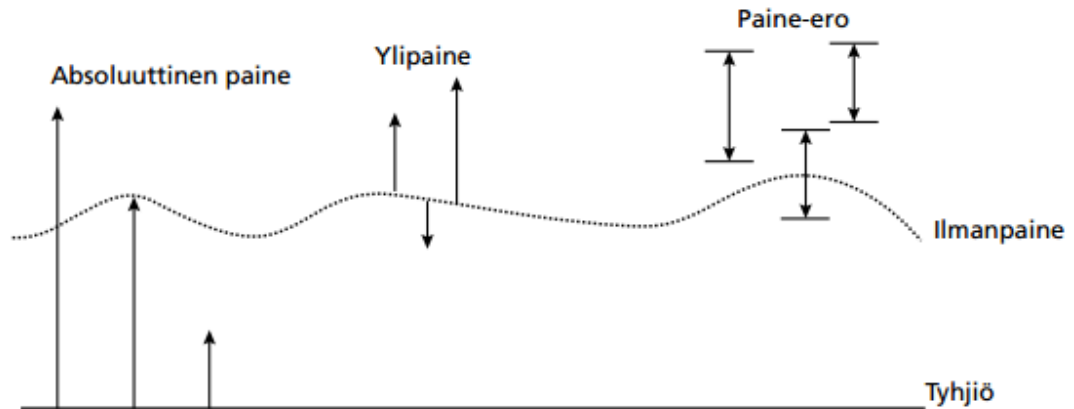
jossa p on paine, ρ on tiheys, g on putoamiskiihtyvyys ja h on korkeusero .

Kalibroimalla selvitetään sisäänsyötetyn paineen ja ulostulon välinen yhteys. Kalibroinnin jäljiteltävyyden edellytys on jatkuvan kalibroinnin ketju SI-yksikön realisointiin. Jos kalibroitaketju katkeaa, on laitteen kalibrointi huomattavasti hankalampaa ja epävarmempaa kuin jatkuvasti oikein aikaväleihin kalibroitava mittalaite. [1]

Oikean tuloksen saamiseksi mittari esikuormataan maksimiarvossa muutaman kerran. Kalibroitava painemittari ja mittanormaali kytketään samaan paineverkkoon, minkä jälkeen kalibroitava mittari sekä painenormaali tasataan ja mittarit asetetaan samalla korkeudelle. Painemittarit paineistetaan ja tulokset tarkastetaan sen tarkkuusluokan mukaan, jonka mittarille on annettu. Tarkkuusaukot kertovat sallitun virheen ja hystereesin suuruuden prosentteina asteikon maksimiarvosta. Tarkkuusluokat ovat 0,1; 0,25; 0,6; 1,0; 1,6; 2,5 ja 4,0 %. Mittari viritetään vaadittavan tarkkuusluokan mukaan ja kalibrointi dokumentoidaan standardien sekä asiakkaan pyynnön mukaisesti. [1]

Painevaakoja käytetään kalibroinnissa yli- ja alipainealueen mittauksissa sekä absoluuttisen paineen mittauksissa. Painevaakojen mittausalueen alapuolella käytetään mittanormaaleina kapasitiivisia antureita ja spinning rotor-mittareita. Absoluuttisen paineen vertailuarvona toimii tyhjiö tai vallitseva ilmanpaine. [1]

Ylipaineen mittauksissa vertailuarvona toimii vallitseva ilmanpaine. Ylipaine voidaan muuttaa absoluuttiseksi paineeksi lisäämällä arvoihin muutoshetkellä vallitseva ilmanpaine. Alipaineen mittauksissa käytetään vertailuarvona vallitsevaa ilmanpainetta, koska päinvastoin kuin ylipaineessa on alipaine kohteen pienempää painetta verrattuna ympäristöön. Kuvassa 2. nähdään, että käytännössä paineen mittaaminen on paine-erojen mittaamista. Paineelle ja sen mittaukseen käytettävistä laitteista käytetään eri nimityksiä vertailuarvojen perusteella. [1][2]



Kuva 2. Paineen mittaaminen on paine-erojen mittaamista. [1]

Painemittarin kalibroinnin tavoitteena on määrittää mittarin näyttämiin käytön aikana tehtävien korjausten suuruudet, tai selvittää, voidaanko mittaria käyttää sellaisenaan ilman erillistä viritystä. Kummassakin tapauksessa keskeinen tekijä on mittarin virhe, joka voidaan määritellä seuraavasti:

$$\text{mittarin virhe} = \text{mittarin näyttämä paine} - \text{mittanormaalinen paine.}$$

Täten laskettujen virheiden avulla mittarin näyttämiä voidaan myös korjata käytön aikana. Tietysti laskettuun virheeseen liittyy tietty epävarmuus, joka on otettava huomioon, jotta vältetään kelvollisen mittarin hylkäämiseltä ja viritystä vaativan mittarin hyväksymiseltä. [1]

2.3 Mekaanisen mittalaitteen kalibrointi

Opinnäytetyön toimeksiantajan yrityksessä mekaaniset mittalaitteet olivat pääsääntöisesti voima- ja vääntömomenttisiä mittalaitteita, minkä takia mekaanisten mittalaitteiden kalibrointiosiossa ei perehdytä muihin kalibrointiperusteisiin. Kalibroinnin lisäksi toimeksiantajalla oli useita kappaleen mittauksia ja kierteiden mittaustarkasteluja, minkä takia asiaa tutkitaan myös kyseisessä opinnäytetyössä.

2.3.1 Vetovoiman ja vääntömomentin kalibrointi

Vetovoima tarkoittaa tunnetun massan aiheuttamaa voimaa maan vetovoimakentässä. Voiman jäljiteltävyys suoritetaan massojen kalibroinneilla ja kansainvälisillä vertailumittauksilla. Voiman muodostuskaava:

$$(F=m \times g)$$

jossa F on voima, m on massa ja g on luonnonvakio painovoimakiihtyvyys, joka on arvoltaan $9,81949(7) \text{ m/s}^2$. [1]

Voimaa mitataan voima-antureilla, jotka mittaavat pääsääntöisesti yksiakselista voimaa, eli yhdensuuntaista voimaa.

Vääntömomentin kalibrointi toteutetaan vääntömomentin perusnormaaleilla tai normaaleilla, jotka perustuvat referenssiantureihin. Vääntömomenttikalibrointi jakautuu kolmeen eri kalibroitiryhmään: vääntömomenttianturit, vääntömomenttityökalujen kalibrointilaitteet ja vääntömomenttityökalut. Vääntömomenttiantureilla on erittäin tiukat tarkkuusvaatimukset mittausepävarmuudessa: 0,05 % - 0,5 %. Vääntömomenttityökalujen kalibrointilaitteiden kalibrointinormaalien mittausepävarmuus ei saa ylittää 0,5 % arvoa. Vääntömomenttityökalujen kalibrointiepävarmuusmittaus on 1 % - 10 %. [1]

2.3.2 Kappaleen mittojen ja kierteiden mittaus

Tarkat mittojen mittaukset tehdään erillisellä mittauskoneella, joka vertaa arvoja omaan asteikkoon tai referenssinormaliin. Mittaus tapahtuu keraamisen pallojärjen tai tasokärjen kosketuksesta. Kappaleen sisäpuolisissa mittauksissa mittaus tapahtuu vipumittakärjellä. Kuvassa 3. on nähtävissä mittauskoneen toiminta. Mittaamalla kohdetta eri mittausvoimalla voidaan poistaa laskennallisesti eri materiaaleilla ja geometrioilla aiheutuneet muodonmuutokset, täten tulos annetaan niin sanotulla nollavoimalla. Nollavoiman saavuttaminen mittauksessa

on pakollista jos kalibroitava kohde ja referenssi ovat eri materiaalia tai erimuotoisia. Mittausten epävarmuudella on useita tekijöitä, jotka vaikuttavat mittausten jäljiteltävyyteen. Mittauksen epävarmuustekijöitä ovat kohteen pinnan karheus ja muoto, mittausolosuhteet, mittalaite, mittauksen pituus ja mittauksessa käytettävät menetelmät. [1][2]



Kuva 3. Kappaleen mittojen mittaus [11]

Kierteiden mittaus ei pääsääntöisesti eroa kappaleen mittojen mittauksesta, koska kierteet ovat osa kappaleen muotoa. Sisäpuoliset kierteet mitataan sisäpuolisella pallokärjellä, ulkopuoliset kierteet mitataan kolmilankamenetelmällä. [1]

2.4 Sähköisen mittalaitteen kalibrointi

Sähköisten mittalaitteiden kalibrointi on huomattavasti laajempi käsitys kuin mekaanisten tai hydraulisten mittalaitteiden kalibrointi. Sähköisillä mittalaitteilla on monessa tapauksessa omat kalibroitiedot ja kalibrointilaitteet, joita käytetään vain tietyn laitteen kalibrointiin. Tässä työssä perehdytään vain toimeksiantajan käytössä olevien mittalaitteiden kalibrointiperusteisiin.

2.4.1 Infrapunalämpömittarin kalibrointi

Lämpötila on intensiivinen suure, joka kuvaa aineen energiatilaa. Lämpötiloja ei voi laskea yhteen, kuten massa tai pituus, koska lämpötila on intensiivistä. Termodynaaminen lämpötila toimii lämpötilan perustana, termodynaaminen lämpötila voidaan esittää esimerkiksi ideaalikaasulailla [12]

$$pV=nRT,$$

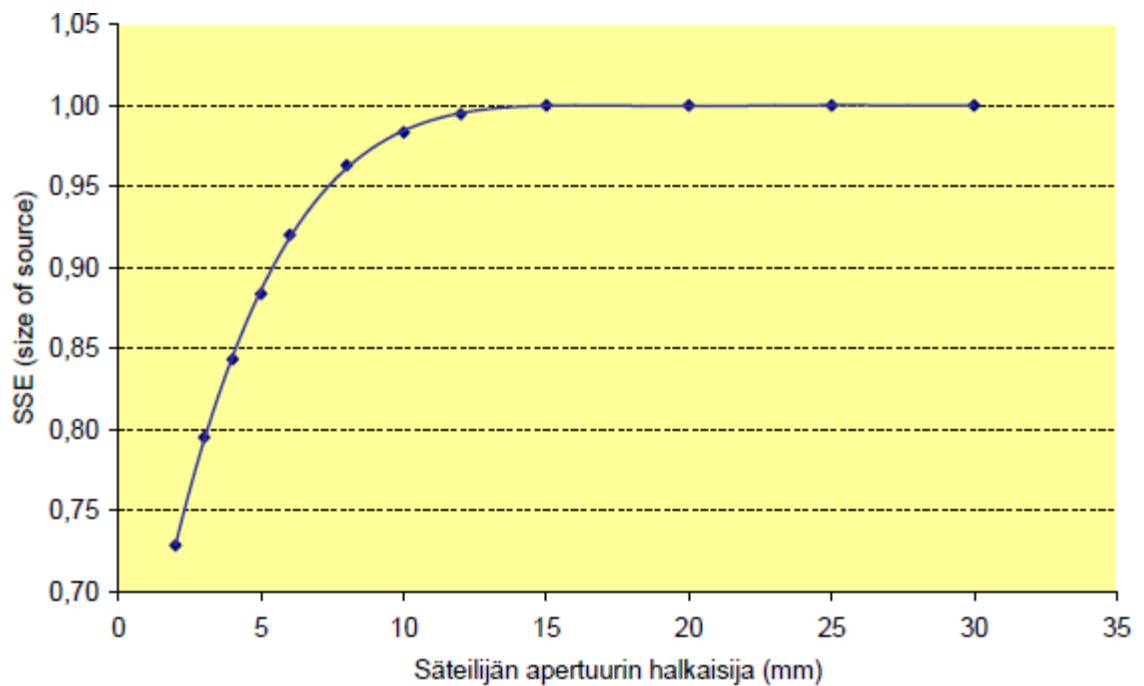
jossa p on paine, V on tilavuus, n on ainemäärä, R on Maxwell-boltzmann ideaalikaasuvakio ja T on termodynaaminen lämpötila.

Termodynaamisen lämpötilan yksikkö on kelvin (K) SI-järjestelmässä. Kelvin on määritelmänsä mukaan $1/273,16$ osa veden kolmoispisteen termodynaamisesta lämpötilasta. Termodynaamisen lämpötilan vaikea mitattavuus on johtanut kansainvälisiin lämpötila-asteikoihin, joita käytetään lämpötilan mittauksissa. [12]

Infrapuna- eli lämpösäteilyllä tarkoitetaan tiettyä sähkömagneettisen spektrin osaa, jota todelliset kappaleet lähettävät absoluuttisen nollopisteen yläpuolella ympäristöönsä tilasta riippumatta. Infrapunalämpömittarin kalibroinnissa käytetään usein kalibrointilamppuja tai mustan kappaleen säteilijöitä. Musta kappale on ideaalinen kappale, joka absorboi kaiken säteilyn läpäisemättä tai heijastamatta mitään. Musta kappale siis säteilee pintansa lämpötilaan verrannollista lämpösäteilyä. Musta kappale ei nimestään huolimatta aina ole musta, sillä pinnan väri riippuu pinnan lämpötilasta. Kalibrointilamppujen yleinen toiminta-alue on $700 - 1\,700$ °C astetta kun säteilijän toiminta-alue on $-40 - 1\,500$ °C astetta. Mustan säteilijän lämpötila mitataan esimerkiksi lämpötila-antureilla, jotka upotetaan säteilijän seinämien tehtyihin onkaloihin. Mittauksen säteilylämpötila lasjetaan ottaen huomioon säteilijän seinämien ja pohjan emissiivisyys sekä säteilijän geometria ja lämpötilagradientit. Infrapunalämpömittarilla mitattu säteilylämpötila on usein alhaisempi kuin mitattavan kappaleen lämpötila, koska kappaleen emissiivisyys on pienempi kuin ideaalisen mustan kappaleen. Esimerkkinä emissiivisyydestä on kuparin emissiivisyys joka on 0.1, kun taas mustan kappaleen emissiivisyys on 1.

Kalibrointilamput on varustettu hyvällä optiikalla, jotta niitä voi käyttää referenssimittareiden kalibrointiin. Esimerkiksi seuraava: volframilankalamppu, jonka nauhamaisen keskimäärin 1-3nm leveä hehkulangan läpi johdetaan sähkövirta, jonka perusteella lasketaan säteilylämpötila.

SSE (size-of-source-effect) eli infrapunalämpömittarin säteilylähteen koon vaikutus vaikuttaa kalibroinnin tuloksiin, koska se on yksi mittarin ominaisuuksista. Infrapunalämpömittari kerää lämpösäteilyä myös kohteen ulkopuolelta, eli mustan kappaleen säteilijän ulkopuolelta. Mittarin optiikan rakenne on päävastuussa kyseiseen epätarkkuuteen. Kuviosta 1. nähdään, että mittarin pyrometri näkee alhaisempia lämpötiloja, kun aukon suuruus on alle 15 mm. Tämä edellyttää myös sitä, että säteilijän lämpötila on korkeampi kuin ympäristön lämpötila. [1][4][12]



Kuvio 1. Pyrometrin näkemät lämpötilat eri aukon halkaisijalla [4]

2.4.2 Tasajännitteen, virran, vaihtojännitteen ja vaihtovirran kalibrointi

Lähes kaikki mittauslaitteet, jotka mittaavat sähkösuureita, resistanssin ohella, perustuvat tasajännitteen jäljiteltävyyteen. Tasajännitteen yksikkö, voltti, määritellään hyvin tarkasti jännitenormaalien avulla. Yleisissä kalibroitipalveluissa, kuten Suomen MIKES, käyttää jännitenormaalialia, jonka uusittavuuden suhteellinen epävarmuus on 10^{-10} [5]. MIKESin jännitenormaali on Josephson-normaali ja kyseisen normaalin perusteella tarkastellaan tasajännitteen kalibrointia. Josephson-normaalista voltti siirretään Zener-käyttönormaaleihin ja niistä kalibraattoreihin ja yleismittareihin. Kun mittausaluetta laajennetaan 10 V:n yläpuolelle, toteutetaan toimenpide resistiivisen jännitteenjakajan avulla. Tasajännitteen jäljiteltävyys perustuu tasajännitteeseen, resistanssiin ja Ohmin lakiin. Kun jäljitetään alle 100 pA:n virtoja, käytetään usein kondensaattoreita, jotka varataan lineaarisesti kasvavalla jännitteellä. [8]

Tutkimuskohteena on nanorakenteissa esiintyvä yksielektroni-ilmiö, joka perustuu kvanttinormaalien kehittymiseen tasavirralla. Tänä päivänä suurin tutkimuksen kohde on mikromekaanisiin antureihin perustuva jännitenormaali ja sen kehittäminen. Kvanttimetrologiakolmion tavoitteena on osoittaa resistanssin, virran ja jännitteen kvanttinormaalien välinen yhteensopivuus Ohmin lain mukaisesti. [1][8]

Tasajännitteen ja tasavirran kalibrointi toteutetaan useimmissa tapauksissa automatisoidulla seurantalaitteella, jossa releasema kytkee normaalit erojännitteet nanovolttimittarille säännöllisin väliajoin. Kyseinen toimenpide kestää usein noin kaksi viikkoa. Tällöin saavutetaan mittalaitteen korkein tarkkuusluokka. Normaalimilla, vähemmän tarkkuutta vaativilla mittalaitteilla kalibroinnit tehdään referenssiyleismittarilla ja yleiskalibraattorilla.

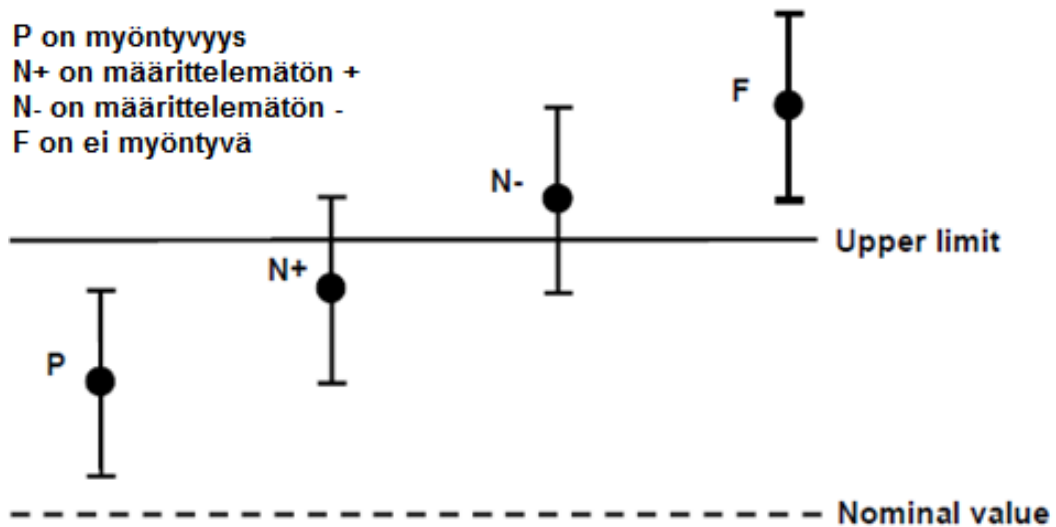
Kun vaaditaan suurta tarkkuutta, käytetään Zener-normaalien kalibrointia, joka tehdään suoraan Josephson-normaalilla. Alle 10 $\mu\text{A/A}$ epävarmuusvaatimusta vaadittaessa tasavirtakalibroinnissa, tehdään kalibrointi resistanssinormaalien yli olevaa jännitettä mittaamalla. Tällöin voidaan saavuttaa hyvin pieni mittausepä-

varmuus. Resistiiviset jännitejakajat kalibroidaan referenssijakajaan ja Josephson-nomraaliin vertaamalla. [1][8]

Vaihtojännitteen ja vaihtovirran kalibrointi vaatii omanlaisensa prosessin kuten tasajännitteen ja virran kalibroinnin. Vaihtojännitteen hyvin tarkkojen mittausten jäljiteltävyys perustuu referenssinormaaleihin, jotka perustuvat puolestaan kalibroituihin termomuuntimiin ja aluevastuksiin. Yleismittareiden vaihtojännitteen ja vaihtovirran kalibrointijäljiteltävyys perustuu kansainvälisiin mittanormaaleihin, jotka on kalibroitu mittaustasnormaalilaboratorioissa. Kyseiset mittanormaalit perustuvat vaihtojännitenormaaleihin ja niiden kalibroituihin alue- ja sivuvirtausvastuksiin. [1][8]

Tyypillisesti vaihtojännitteen ja vaihtovirran kalibroitavat laitteet ovat tarkat yleismittarit, virtamuuntajat, virtasanturit, kalibraattorit ja termomuuntimet. Kalibroinnin suorittaja vertaa AC/DC mitattuja arvoja kalibroivan tahon hallussa olevan kalibrointilaitteen käyttönormaaliin. Sivuvirtauksien AC/DC:n eroa verrataan suoraan laitteiden tehollisarvoon ja kalibroitavan toimijan mittauksen tehollisarvoon. [1][6][8]

Seuraavaksi on esimerkki yleismittarin kalibrointitodistuksen mittaustarkkuusperustelusta, joka suoritetaan aina yleismittarin vuotuisesta kalibroinnista. Kuviossa perustellaan tietyn tarkkuuden rajat ja mitattavan laitteen myöntävyys kyseisiin rajoihin. Kuvio on nähtävissä kuvassa 4, jossa on kyse tehosensorin myöntävyysasteikko kalibrointitarkkuuteen. Kyseisellä laitteella on todistuksen mukaan 95 %:n myöntävyys ja laitteelta vaaditaan vähintään kyseistä prosenttia täyttääkseen kalibrointi-tarkkuuden. [1][6][8]



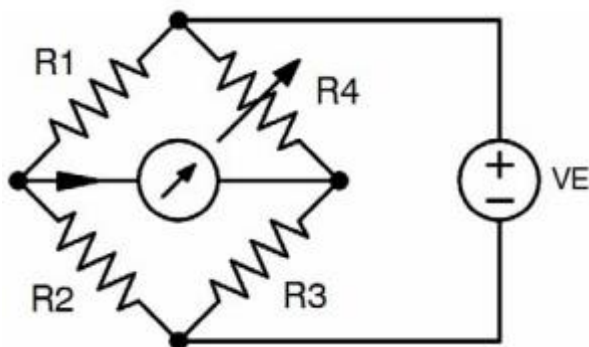
Kuva 4. Mittalaitteen kalibroinnin myöntövyyskuvio [6]

Kuvan 4. merkkien selitys:

- P Myöntövyys, joka merkitsee keskiarvoista myöntövyysarvoa kalibroinnissa. P – arvon saavuttaminen tarkoittaa hyvin tarkkaa kalibrointia ja hyväkuntoista mittalaitetta.
- N+ Määrittelemätön+, eli mittalaitteella on mahdoton varmistaa 95 %:n varmuus mutta mitatut arvot ovat juuri laitteen määriteltyjen arvojen sisällä. Täten mittaustarkkuus on tarpeeksi tarkka normaaliin käyttöön.
- N- Määrittelemätön-, eli mittalaitteella on mahdoton varmistaa 95 %:n varmuus, mutta mitatut arvot ovat juuri laitteen määriteltyjen arvojen ulkopuolella. Täten mittaustarkkuus on epätarkka.
- F Ei myöntövyä, joka merkkää mittalaitteen olevan ulkona annetuista laitteen määritellyistä arvoista ja 95 % varmuudesta. Täten mittaustarkkuus on huono.

2.4.3 Resistanssin kalibrointi

Resistanssin suuretta käytetään useiden sähkösuureiden jäljiteltävyyden toteuttamiseen, mikä tekee resistanssin kalibroinnista erittäin tärkeän perussuureen. Resistanssin jäljitettävyys perustuu monissa tapauksissa kvantti-hallanormaaliin, jonka avulla resistanssin yksikkö voidaan sitoa luonnonvakioihin. Kyseisellä normaalilla saavutetaan noin 10^{-8} suhteellinen epävarmuustaso. Luonnonvakioon sitomisen jälkeen jäljiteltävyys siirretään sekundääri- ja käyttönormaaleina käytettäviin resistanssinormaaleihin, joita säilytetään lämpötilastabiloidussa öljy- tai ilmahauteessa. Sitä tehdään kryogeenisellä virtavertaimella tai digitaalisella resistanssisillalla. Usein käytetään muunnettua Wheatstonen siltaa, kun jäljiteltävyyttä haetaan yli $1 \text{ G}\Omega$:n resistanssinormaaleja. Wheatstonen sillan peruskytkentä on nähtävillä kuvassa 5, jossa kytkentä on Wheatstonen sillan peruskaavio. Sillasta on kymmeniä variaatioita eri käyttötarkoituksiin. [1][8][13]

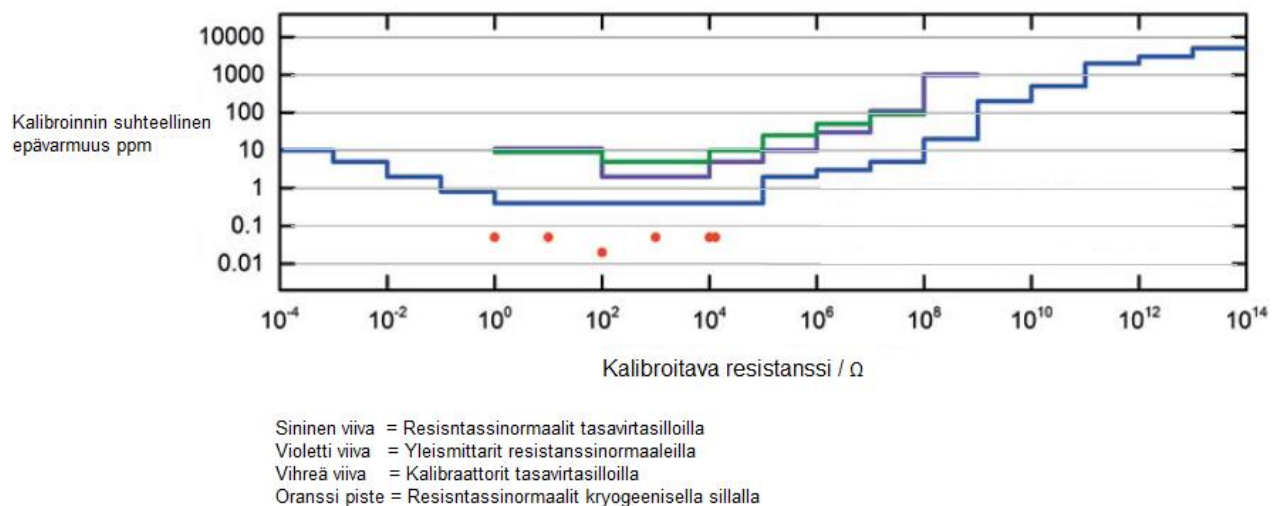


Kuva 5. Wheatstonen silta [13]

Resistanssikalibroinnissa mitataan kalibroitavan mittalaitteen resistanssi ja mitaustuloksen epävarmuus. Resistanssin lämpötila-, jännite- tai tehoriippuvuus voidaan määrittää tarvittaessa. Tavallisimpia kalibroitavia mittalaitteita resistanssinormaalien ohella ovat tarkkuusyleismittarit ja yleiskalibraattorit.

Resistanssinormaalien alueella $0,0001 \text{ }\Omega$ – $100 \text{ M}\Omega$ kalibroidaan vertaamalla resistanssinormaaleja kalibroinnin suorittajan primääri- ja käyttönormaaleihin. Primääri- ja käyttönormaalit saadaan käyttöön kalibroijan hallussa olevan lait-

teen resistanssisillalla. Suomen MIKES käyttää MI 6243B -resistanssisiltaa [7]. Erikoistarkkuutta vaadittaessa mittauksia tehdään myös kryogeenisellä virtaver-
 taimella. Alueella 1 M Ω - 100 T Ω käytetään vertailussa muunnettua Wheatstonen siltaa. Itse suorituksessa resistanssit laitetaan kalibroinnin ajaksi lämpöhau-
 teeseen. Mittaukset suoritetaan 2- tai 4-pisteisesti, tarvittaessa 8-pisteisesti. Normaali-
 yleismittareiden resistanssialue kalibroidaan yleiskalibraattorilla ja kalibraattorin tarkkuusyleismittarilla. Kuvassa 6. nähdään kalibroinnin suhteelli-
 nen epävarmuus eri normaaleilla ja kalibraattorilla suhteessa kalibroitavaan re-
 sistanssiin. [2][5][8]



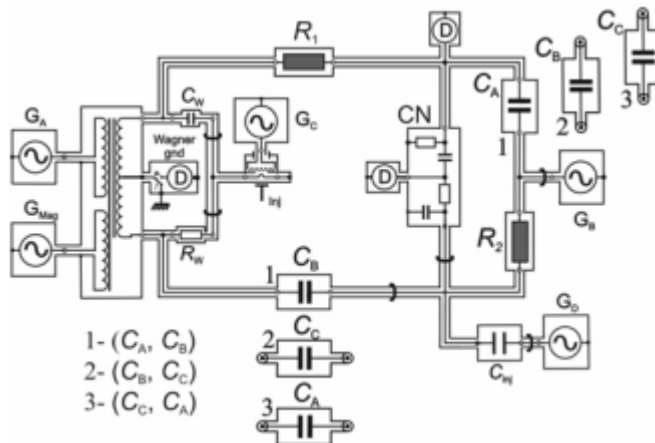
Kuva 6. Kalibroinnin suhteellinen epävarmuus suhteessa kalibroitavaan resistanssiin [8]

2.4.4 Kapasitanssin ja induktanssin kalibrointi

Kapasitanssin ja induktanssin kalibrointi on hyvin tärkeä osa elektroniikan suorituskykyä, koska kondensaattorit ja kelat ovat olennainen osa elektroniikkaa. Kondensaattoreiden ja kelojen lisäksi kapasitiivisia antureita käytetään useissa merkittävässä mittauksissa, esimerkiksi pinnankorkeus, paikka – ja etäisyysmit-
 taukset. Kapasitanssin ja induktanssin jäljiteltävä mittaaminen on myös tärkeää,

koska tarkkojen LCR-mittareiden kalibrointi tehdään kapasitanssi ja induktanssinormaaleilla.

Kapasitanssi jäljitetään niin sanotun kvadratuurisillan avulla taajuuteen ja resistanssiin. Taajuus ja resistanssi ovat molemmat kansainvälisesti ylläpidettyjä suureita. Jäljittäminen tehdään dekadeittain 10 pF - 1 μ F alueella normaaleissa kapasitanssin jäljiteltävyyksissä. Väliarvot interpoloidaan mittasilloilla, jotka perustuvat induktiivisiin jakajiin. Induktanssit 100 μ H – 100 mH alueella ovat jäljitettäviä kapasitanssinormaaleihin ja resistanssinormaaleihin. Kuvassa 7. on nähtävissä esimerkki kvadratuurisillasta. Kuvan 7. kvadratuurisilta mittaa kolmella erillä kapasitanssinormaaleilla. [1][9][14]



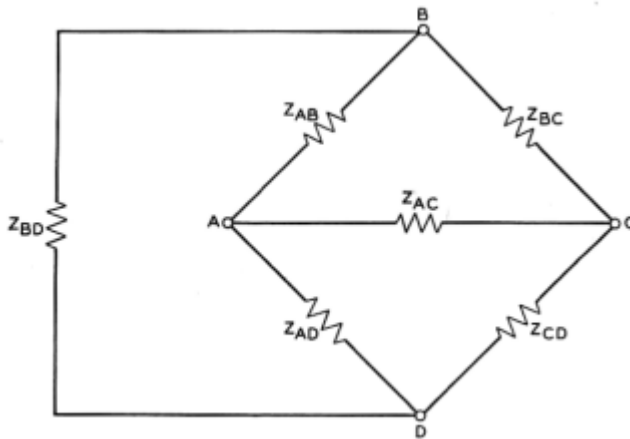
Kuva 7. Kvadratuurisilta [15]

Alueella 0 pF - 1 μ F kapasitanssin kalibrointi suoritetaan erittäin stabiilia kapasitanssisiltaa käyttäen. Lisäksi käytetään tarkasti määritettyjä referenssikapasitanssinormaaleja. Kapasitanssin mittaukset tehdään yleensä 1 kHz:n taajuudella mutta muitakin mittaustaajuuksia käytetään. Kalibrointi suoritetaan 2 - 3 päivän aikana kytkemällä joko kaksipisteisesti tai kolmipisteisesti kalibroitava kapasitanssinormaali 16-kanavaisen koaksiaalireleen kautta kapasitanssisiltaan. Kalibroittavat normaalit sijoitetaan vakio-lämpöiseen tilaan lämpötilanturin kanssa. Normaalin tilan lämpötilaa vaihdellaan noin 1 - 2 $^{\circ}$ C:n mittauksen aikana, jotta normaalin lämpötilakerroin saadaan mitattua. Jälkikäteen tu-

lokset korjataan 23 °C lämpötilaan. Toimenpide suoritetaan automatisoidusti kalibrointiin kykenevällä laitteella. [1][9]

Alueella 100 μH – 100 mH suoritettavien induktanssikalibrointien jäljiteltävyys perustuu kalibroituihin resistanssinormaaleihin ja kapasitansseihin. Kyseiset resistanssinormaalit ja kapasitanssit ovat jäljiteltävissä kvantti-hall-resistanssinormaliin.

Sarjaresonanssijärjestelmää käytetään mittausalueen yläpäässä 10 mH:n ja 100 mH:n alueilla. Mittauksien yläpäässä kalibrointien jäljiteltävyys perustuu impedanssisiltaan ja sen samansuuruisiin kapasitansseihin taajuudella 1 kHz tai 1,59 kHz. Impedanssisillan yksinkertaistettu versio on nähtävissä kuvassa 8. Kalibroitaessa pieniä induktansseja (100 μH – 10 mH) kalibrointi perustuu kalibroitavan induktanssin ja referenssivastuksen impedanssisuhteen mittaamiseen jännitteen näytteistykseen avulla. Mittauksessa mittaustaajuus on normaalisti alle 1 kHz. Kuvassa 9. on nähtävissä AH2500A-mittasilta ja kalibroitava 1 nF kapasitanssinormaali. [1][9]



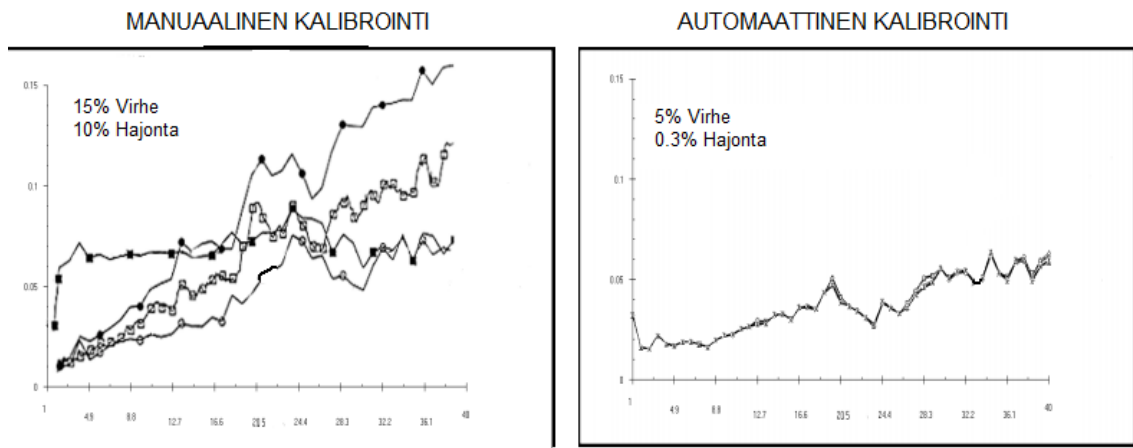
Kuva 8. Impedanssisilta yksikertaisimmassa muodossa [15]



Kuva 9. AH2500A-mittasilta ja kalibroitava 1 nF kapasitanssinormaali [8]

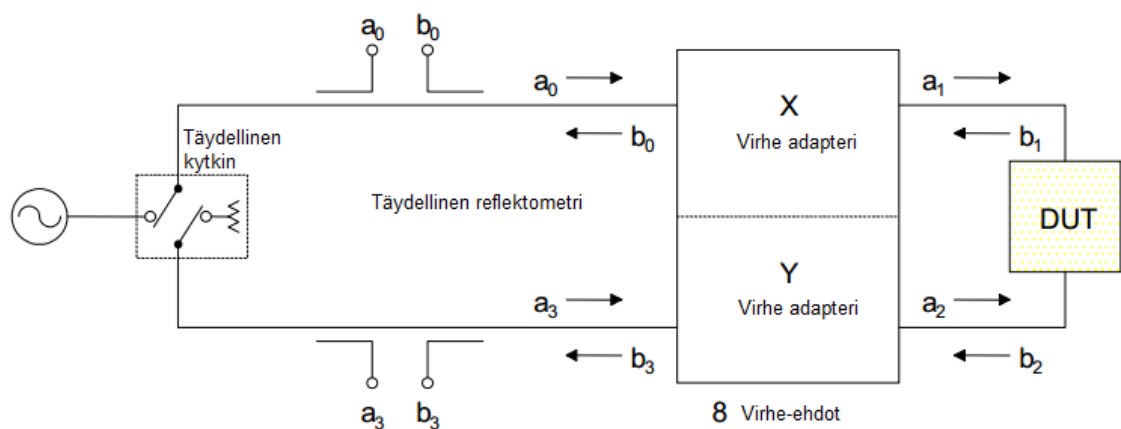
2.4.5 RF - kalibrointi

RF-sovellusten määrä kasvaa nykyään jatkuvasti ja sen myötä määrä luotettavaan RF - mittauksiin korostuu. RF-kalibroinnissa hyvin tärkeänä osana on mittaukseen käytettävien laitteiden tarkkuus. Esimerkiksi RF-kalibroinnissa on välttämätöntä käyttää tarkkuus N-liittimiä, joiden taajuusalue ulottuu ainakin 18GHz:iin asti. Mittaukset tulisi suorittaa tarkkuussäädetyssä 23 °C:n lämpötilassa, joka on sähkömagneettisesti suojattu. Kalibrointien jäljiteltävyys perustuu kansainvälisiin mittanormaaleihin, jotka ovat National Physical Laboratoryn suorittamia tehon ja vaimennuksen kalibrointeja. National Physical Laboratory on isossa-Britanniassa toimiva kansainvälinen mittanormaallaboratorio. Jäljiteltävyydet ovat tarkimpia kun ne perustuvat kyseiseen National Physical Laboratoryn kalibrointeihin ja kalibroinnin suorittajan omiin primäärisiin mittanormaaleihin. Kolme yleisintä RF - kalibroinnin aluetta ovat tehon, vaimennuksen ja heijastuskertoimen kalibrointi. Kaikki kalibroinnit suoritetaan nykyään automatisoidusti ja usean päivän ajan. Kuva 10. selvittää automatisoidun ja manuaalisen kalibroinnin mittaustarkkuuksia 40 GHz:n taajuudella. [1][10, s. 3]



Kuva 10. Manuaalisen ja automaattisen kalibroinnin tarkkuuserot [10, s. 3]

Tehon kalibrointi perustuu anturien kalibrointikertoimiin, jotka määritetään tehonjakajaan perustuvalla mittalaitteistolla. Tehomittausrunгон tehoreferenssin absoluuttisen tehon kalibroidaan diodi- ja termopariantureilla. Antureiden kalibrointiin kuuluu myös heijastuskerroinmittaus vektoripiirianalysaattoreilla. Kuva 11. Perusteet vektoripiirianalysaattorin toiminnasta



Kuva 11. Vektorianalysaattorin toimintaperiaate [10, s. 13]

Vaimennuskalibrointi suoritetaan jäljitettävillä vektoripiirianalysaattorimittauksilla. Vaimentimien kalibrointiin kuuluu määrittäminen heijastuskertoimista. Askelvaimentimien kalibrointi suoritetaan askelvaimentimen ohjaamisella, joka voidaan tehdä GPIB-väylällä, RS-232-liittymän välityksellä tai suoraan Agilent 11713A-askelvaimentimen ohjaimen välityksellä.

Heijastuskertoimien jäljiteltävyys toteutetaan vektoripiirianalysaattoreilla. Tarkat N-tyyppin ilmalinjadimensiomittaukset määrittävät mittauksissa käytettävät impedanssinormaalien impedanssit. [1][4][10, s. 13]

3 MITTALAITTEIDEN KARTOITUS, OHJEISTUS JA YLLÄPITO

Mittalaitteiden kalibrointi ja kartoitusjärjestelmä oli minun varsinainen työ, joka suoritettiin toimeksiantajan valvonnan alla. Kyseinen työ on selostettu työn ala-otsikoissa, mutta itse työ on vain yrityksen käytössä, koska työssä on salassa pidettävää materiaalia. Työ kattoi mittalaitteiden kalibrointien tarkastelun, mitta-laittekartoituksen ja mittalaitteiden kalibroinnin ylläpitosuunnittelun.

Työn tarkoituksena oli selkeyttää toimeksiantajan mittalaitteiden kalibrointia ja luoda käyttöohjeet tulevalle kalibrointijärjestelmälle. Työssä tarkasteltiin lähes kaikki toimeksiantajan tehtaasta löytyvät mittalaitteet muutamaa poikkeusta lukuun ottamatta. Mittalaitteiden kartoitus tehtiin selvitykseksi käyttöön otettavalle yritykselle, joka kalibroi mittalaitteet. Mittalaitteiden tiedot ja käyttöympäristöt kartoitettiin kyseisen yrityksen tietokantaan. Ohjeistus kirjoitettiin toimeksiantajan ohjeiden mukaisesti jokaisen työntekijän luettavaksi. Käyttöönottolomake luotiin selkeyttämään ja helpottamaan uusien mittalaitteiden rekisteröimistä tehtaan käyttöön.

3.1 Mittalaitteiden kartoitus

Toimeksiantajan mittalaitteet kartoitettiin Excel-pohjaan, johon merkittiin kaikki oleellinen tieto mittalaitteesta ja sen työympäristöstä. Kartoitus kattaa lähes koko toimeksiantajan tehtaan mittalaiteresurssit muutamaa erillistä osanaluetta lukuun ottamatta. Liite 1. sisältää kartoituksen mittalaitteet ja laitteiden tekniset tiedot. Kartoituksessa selvitettiin myös jokaiselle mittalaitteelle vastuuhenkilö, laitteen informaatio, status ja kalibrointi-informaatio sekä ostotiedot. Liitteessä 1. on nähtävillä vain osa koko kartoituksesta, koska oleellisin tieto opinnäytetyön kannalta on näyttää tehty kartoitus. Mittalaittekartoitus on nähtävillä liitteessä 1.

3.2 Mittalaitteiden kalibrointijärjestelmän ohjeistus

Mittalaitteiden käyttöönottoon, käytöstä poistamiseen ja vanhojen laitteiden päivitykseen laadittiin toimeksiantajan vaatimusten mukaisesti ohjeistus. Ohjeistus kattaa kaiken tarvittavan mittalaitteen kalibrointiin ja seurantaan liittyen. Ohjeistus painottuu toimeksiantajan kalibrointien suorittajan sisäisten sivujen ja systeemin ohjeistamiseen, koska ohjeistus on tehty mahdollisimman selkokielellisesti jokaisen tehtaan työntekijän ulottuville. Ohjeistus on nähtävillä liitteessä 2.

3.3 Mittalaitteiden käyttöönottolomake

Uusien mittalaitteiden saapuessa pitää kyseiset laitteet kartoittaa järjestelmään kalibrointitietojen takia. Täten mittalaitteiden käyttöönottolomake kehitettiin täytettäväksi sähköisesti jokaisen uuden mittalaitteen osalta. Kyseinen lomake tehtiin Abode Reader X Pro-ohjelmalla. Käyttöönotto-lomake on nähtävillä liitteessä 3.

4. YHTEENVETO

Tässä opinnäytetyössä perehdyttiin usean eri mittalaiteluokan kalibroinnin toimintaperiaatteisiin. Pääasiallisesti työssä perehdyttiin vain niihin mittalaitteisiin, joita toimeksiantajan tehtaasta löytyi. Työn pääpaino oli kartoituksen lisäksi tehty ohjeistus, joka tehtiin toimeksiantajan protokollan mukaisesti ja tallennettiin yrityksen sisäiseen intraan.

Opinnäytetyö tehtiin tutkimusluonteisesti, ja sen tarkoituksena on perehdyttää lukija eri mittalaitetyyppien kalibroinnin maailmaan. Itse toimeksiantajan työ on luettavissa liitteistä.

Järjestelmän jatkokehitystä ovat järjestelmän kehitys, työntekijöiden kehittäminen rutiininomaiseen käyttäytymiseen kalibrointi-järjestelmää kohtaan ja mittalaittekartoituksen ylläpito.

Järjestelmän kehityksellä tarkoitan nykyisen järjestelmän käyttäjiltä kerättävää palautetta. Kerätyillä palautteilla voidaan tutkia järjestelmän ongelmakohtia ja ongelmat poistaa järjestelmästä. Täten järjestelmästä saadaan käyttäjäystävällisempi, helpompi käyttää ja taloudellisempi.

Työntekijöiden rutiininomaisella käyttäytymisellä tarkoitan asian rutiininomistamista jokaiselle työntekijälle eli selitetään mitkä mittalaitteet pidetään kalibrointikartalla ja mitkä ovat kulutustavaraa. Työntekijöiden tulee tietää mittalaitteita haettaessa, että jokaisesta kalibrointia tarvitsevasta mittalaitteesta on aina tehtävä käyttöönottolomake. Jokainen tietämättään tai tietäen käyttöönottolomakkeen täyttämättä jättäminen kalibrointivasta mittalaitteesta vaikuttaa osaltaan mittalaittekartoituksen, kalibrointijärjestelmän epäluotettavuuteen ja tilanteisiin, joissa menetetään työtunteja asian selvityksen takia. Tämän takia mittalaitteet, jotka vaativat kalibroinnin, on merkittävä selvästi, ettei yhtään kyseistä mittalaitetta saa käyttöön ilman käyttöönottolomakkeen tekoa.

Mittalaittekartoituksen ylläpidolla tarkoitan nykyisen kartoituksen pohjalta tehtävää asemakartoitusta, joka valvoo jokaisen pisteen mittalaitteita ja niiden sijaintia. Asemavastaavien tulee aina tietää mittalaitteiden kunto ja olla tietoinen lait-

teiden sijainnista. Kartoitettaessa mittalaitteita tehtaassa todettiin, että jokaisella asemalla tulisi olla selvästi näkyvillä oleva lista aseman mittalaitteista ja niiden käyttäjistä. Tällöin mittalaitteiden seuranta ja ylläpito olisi helpompaa ja selkeämpää. Kun jotain mittalaitetta tarvitaan, voidaan kyseisestä luettelosta katsoa, missä tai kenen vastuulla kyseinen mittalaite on, jolloin ei tarvitse käyttää aikaa mittalaitteen satunaiseen etsimiseen hyllystä.

Kyseinen toimenpide vaatii asemavastaavilta selkeää valvontaa ja sitä että jokainen asematyöntekijä noudattaa luettelon ylläpitämistä.

Mittalaitteet ja työkalut ylipäätään ovat hyvin merkittävä osa toimeksiantajan kokonaisuutta, minkä takia suuri osa tehtaan työntekijöiden työpanoksesta ja suoritetusta työstä heijastuu suoraan käytettäviin työkaluihin. Kun tehtaan työkalut pidetään kunnossa ja jokaisen työntekijän käsien ulottuvilla helposti ja selkeästi, voidaan säästää huomattava määrä resursseja taloudellisesti ja henkisesti. Jatkuva kehittäminen ja toiminnan parantaminen on yksi isommista taloudellisista valteista.

LÄHTEET

- [1] MIKES kalibrointi-esite [www-dokumentti]. Saatavilla: http://www.mikes.fi/mikes/Esitteet/kalibrointiesitteet_www.pdf. (Luettu 2.9.2014)
- [2] Wikipedia, kalibrointi [www-sivu]. Saatavilla: <http://en.wikipedia.org/wiki/Calibration>. (Luettu 2.9.2014)
- [3] Pusa. A. J. Metrologian asiantuntija [Seminaaridokumentti 17.11.2009]
- [4] AEL Insko-seminaari, Kalibrointi – tarve ja suoritus käytännössä. [Seminaaridokumentti 17.11.2009]
- [5] MIKES kalibrointi-esite, sivu 22. [www-dokumentti]. Saatavilla: http://www.mikes.fi/mikes/Esitteet/kalibrointiesitteet_www.pdf (Luettu 4.9.2014)
- [6] Calibration certificate, Power Sensor, Hewlett Packard, 8482A [Kalibrointitodistus]. Saatavilla: Sandvik mining and construction Oy, kalibrointiarkisto. (Luettu 4.9.2014)
- [7] MIKES asiakaspalvelu. [Asiakaspalvelu]. Puhelinvaihe 029 5054 000 (Soitettu 8.9.2014)
- [8] Piltz Harri. AEL Insko-seminaari, sähkömittalaitteiden kalibrointi. [Seminaaridokumentti 17.11.2009]
- [9] MIKES kalibrointi-esite, [www-dokumentti]. Saatavilla: <http://mikes-upload.innofactor.com/documents/upload/kapasitanssi.pdf>. (Luettu 9.9.2014)
- [10] Advanced RF calibration techniques. [www-dokumentti]. Saatavilla: http://ekv.epfl.ch/files/content/sites/ekv/files/mos-ak/wroclaw/MOS-AK_AL.pdf. (Luettu 15.9.2014)
- [11] SIP-calibration, length measurement machines, [www-dokumentti]. Saatavilla: <http://www.sip-calibration.com/index.php?NodeID=821&SourceID=817&LayerMenuID=817>. (Luettu 16.9.2014)
- [12] Nikkarila Juha-Pekka. J AEL Insko-seminaari, lämpömittareiden kalibrointi. [Seminaaridokumentti 17.11.2009]
- [13] Texas Instruments, The Wheatstone bridge, sivu 5. [www-dokumentti]. Saatavilla: <http://www.ti.com/lit/ml/slyp163/slyp163.pdf>. (Luettu 25.9.2014)
- [14] L.Callegaro, V. D'Elia, and B.Trinchera, Calibration of capacitance standards with a quadrature bridge, sivu2. [www-dokumentti]. Saatavilla: http://www.imeko2009.it.pt/Papers/FP_424.pdf. (Luettu 25.9.2014)
- [15] John G. Ferguson, Classification of bridge methods of measuring impedances, sivu 3. [www-dokumentti]. Saatavilla: <http://www3.alcatel-lucent.com/bstj/vol12-1933/articles/bstj12-4-452.pdf>. (Luettu 28.9.2014)

